

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 913+551.4.08

А.В. Бредихин¹, Е.А. Еременко², С.В. Харченко³, Ю.Р. Беляев⁴, Ф.А. Романенко⁵, С.И. Болысов⁶, Ю.Н. Фузеина⁷

РАЙОНИРОВАНИЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ ПО ТИПАМ АНТРОПОГЕННОГО ОСВОЕНИЯ И СОПУТСТВУЮЩЕЙ ТРАНСФОРМАЦИИ РЕЛЬЕФА НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Выполнен сбор и систематизация сведений о наличии и распространении разных типов антропогенных объектов (населенных пунктов, транспортной инфраструктуры, участков горнодобычи и пр.) в Арктической зоне России. Информация об антропогенных объектах взята из открытых источников в сети Интернет: картографических проектов, баз данных, проектов и схем перспективного развития субъектов Российской Федерации. Установлено, что лишь пятая часть территории Российской Арктики затронута хозяйственным освоением, на остальной же части ее территории антропогенные объекты практически отсутствуют. Степень хозяйственной освоенности арктических территорий закономерно снижается с запада на восток. Наибольшей хозяйственной освоенностью характеризуется Республика Карелия (лишь 13,1% от площади субъекта в пределах Арктической зоны в настоящее время не затронуты хозяйственной деятельностью), наименьшей – Красноярский край (95,2%) и Республика Саха (Якутия) (87,2%). Данные о наличии, положении и типах антропогенных объектов подвергнуты процедуре кластерного анализа методом *k-means* с целью выделения характерных комбинаций объектов, соответствующих разным типам освоения. В пределах Арктической зоны России выделены шесть основных типов освоения, каждый из которых характеризуется доминированием определенного типа антропогенных объектов (селитебных объектов, автодорог разных категорий, объектов горнодобывающей отрасли, объектов транспорта углеводородов, инфраструктуры лесозаготовки). Также выделяется особый тип освоения – комплексное освоение, для которого характерно сочетание от трех до пяти выделенных типов на ограниченной площади. Каждому типу освоения свойственны определенные сочетания направлений и степени трансформации рельефа. В частности, наибольшая трансформация рельефа отмечена в пределах участков открытой горнодобычи (525 карьеров общей площадью 605 км²): здесь не только образуется широкий спектр антропогенных форм разного размера, но также полностью нарушается на многие десятилетия естественный ход процессов рельефообразования (мерзлотных, флювиальных, склоновых и пр.). Наименее значимое влияние на развитие рельефа оказывают некоторые линейные транспортные сооружения, в частности, грунтовые дороги и газопроводы при подземной прокладке. В зависимости от существующих типов освоения субъектам РФ, входящим в Арктическую зону, свойственны различные формы влияния хозяйственной деятельности на развитие рельефа. Для регионов с ведущей ролью транспортной инфраструктуры (например, Архангельская область, Карелия, Республика Саха) характерно более значимое участие косвенного воздействия человека на развитие рельефа, в сравнении с прямым (негативные последствия в придорожных полосах объектов инфраструктуры охватывают площади, превышающие площади антропогенных форм). Для участков преобладания горнодобычи (например, Мурманская область), напротив, наибольшая трансформация рельефа связана с прямым воздействием, прежде всего, широкомасштабным созданием антропогенных форм. Показано, что в целом Арктическая зона России освоена хозяйственной деятельностью достаточно слабо: трансформация рельефа и спектра естественных геоморфологических процессов затрагивает общую площадь около 667 тыс. км², что составляет около 18% от всей площади Российской Арктики.

Ключевые слова: Арктическая зона России, антропогенный рельеф, освоение Арктики, многомерная статистика

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, заведующий, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail*: avbredikhin@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: eremenkoeaig@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: har4enkkoff@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: yrbel@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: faromanenko@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail*: sibol1954@bk.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: donaldw@bk.ru

Введение. Взаимоотношения человека и природы в Арктике (здесь и далее под *Арктикой* понимается территория Арктической зоны Российской Федерации, границы которой определены Указом Президента Российской Федерации «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» № 296 от 02.05.2014 г.) насчитывают несколько тысяч лет, и все это время антропогенная деятельность оказывала влияние на рельеф и геоморфологические процессы. На ранних этапах очагов освоения было сравнительно немного, а площади, затронутые деятельностью человека, были очень малы и ограничивались лишь участками небольших поселений и стоянок. Так, выявлены жилища и стоянки древних людей в низовьях р. Яны (28–27 тыс. л. н.), на островах Де-Лонга (около 8 тыс. л. н.), на Чукотке, в Корьякии, на Ямале, на Верхней Пясине и на р. Хете [Питулько, 1998; Хлобыстин, 1998]. Вплоть до середины второго тысячелетия хозяйственная деятельность в Арктике сводилась к селитьбе, охоте, собирательству, рыболовству и пастбищному оленеводству. В сравнении с прочими видами природопользования перечисленные практически не оказывали воздействия на развитие рельефа. Ситуация коренным образом изменилась в XV веке, когда в северо-западном Беломорье возник первый в Арктике район массовых проходческих и добычных работ, сопровождавшийся значительной трансформацией рельефа (появлением антропогенных форм, изменением условий развития рельефа и пр.) – Чупинский слюдяной промысел. Однако позднее, вплоть до революционных событий начала прошлого столетия, площади, затронутые антропогенным освоением, оставались в Арктике крайне малы. По-прежнему абсолютно преобладали традиционные виды природопользования, поддерживаемые коренными народами Севера. Начало направленного интенсивного вовлечения арктических ресурсов и территорий в экономическую деятельность государства было положено А.В. Колчаком, утвердившим в 1919 г. Положение о Комитете Северного морского пути. Вслед за развитием морского транспортного сообщения в Арктике возникают первые очаги обширного площадного ресурсного освоения, в частности крупный лесопильный промышленный узел в Игарке, Вайгач-Амдерминский горнорудный узел, трест «Апатит» в Хибинских горах, начинается разведка Ухтинской нефти, появляются и другие крупные хозяйственные объекты. Таким образом, важной особенностью Арктической зоны России является в целом сравнительная «молодость» антропогенного вмешательства в функционирование природных геосистем: хозяйственное освоение обширных пространств, сопровождавшееся строительством жилищных, промышленных и транспортных объектов, началось здесь лишь в последнее столетие. Антропогенное освоение арктических территорий, безусловно, не было равномерным как во времени, так и в пространстве: рост и спад хозяйственного воздействия на природные геосистемы (и в частности, на рельеф) в разных районах метакорреляции.

Хозяйственная деятельность человека в Арктике в последнее столетие неизменно сопровождалась воздействием на рельеф, которое было как прямым (изменение морфологии рельефа путем создания антропогенных форм и трансформации облика естественных форм рельефа), так и косвенным (изменение условий протекания геоморфологических процессов, в частности, характера растительного покрова, геокриологических условий, параметров тепломассопереноса, гидрологических характеристик и пр.). В результате за столетие освоения на территории Арктической зоны возникли сложно устроенные природно-техногенные системы, для которых характерно наличие антропогенного рельефа и отложений разного возраста, антропогенно стимулированные геоморфологические процессы (в том числе не развитые в естественных условиях в Арктике), а ход природных процессов в разной степени нарушен вмешательством человека. Характер трансформации рельефа и геоморфологических процессов определяется, прежде всего, основным типом использования той или иной территории, а также применявшимися технологиями и способами освоения. Тип освоения определяет характерный набор создаваемых антропогенных форм, направления трансформации естественного рельефа и вмешательства в развитие естественных геоморфологических процессов. Освоенные территории, как используемые в настоящее время, так и заброшенные, могут рассматриваться как полигоны для изучения последствий антропогенного воздействия, а также, что представляется чрезвычайно важным, для разработки стратегии будущего бесконфликтного природопользования в Арктике.

В последние 20 лет исследованию экологических последствий освоения Арктики был посвящен обширный комплекс научно-исследовательских работ, особенно возросло число научных публикаций после Четвертого международного года Арктики (2007–2008) и Года Арктики в России (2012) [Махраханов, 2011; Романенко, 2013; Деркач, 2012; Зотова, Тумель, 2018; и др.]. Для оптимизации освоения северных территорий рассматриваются природные риски и безопасность хозяйствования с учетом природной специфики территории [Ельчанинов, 2014; Дмитриев, 2013; Кожухов с соавт., 2013; Большагин с соавт., 2014; Кочуров с соавт., 2015; Шполянская, Зотова, 1999; и др.]. Обширный круг вопросов, связанных с воздействием антропогенной деятельности на геокриологические условия, а также криогенными деформациями зданий и сооружений рассматривается в работах отечественных криолитологов [Тумель с соавт., 2005; Зотова с соавт., 2007; Гребенец, Исаков, 2016; Shiklomanov et al., 2017]. В то же время, влияние человека на развитие рельефа Арктики (в комплексе, а не только мерзлотного) до сих пор остается в целом слабо изученным, так как исследуется либо на конкретных ключевых участках (например, [Сафьянов, Репкина, 2012; Козлова, 2013]), либо в общем, на уровне теоретических обобщений [Воскресенский, 2001; Чеснокова, 2013; и др.].

Сведения о масштабах антропогенной трансформации рельефа в Арктической зоне в целом, площадях, затронутых разными типами воздействия, объемах перемещения материала и географических закономерностях распространения разных типов трансформации в настоящее время в научных работах не представлены. В то же время такого рода сведения необходимы для разработки стратегии грамотного природопользования в Арктике в будущем. Важно оценить не только масштаб трансформации рельефа в целом (а ведь именно рельеф является основной не только природных, но и природно-техногенных ландшафтов), но и ее региональные различия.

Цель представленного исследования – мелко-масштабное районирование Арктической зоны России по степени антропогенной (прежде всего, хозяйственной) освоенности (однопризнаковое однородное районирование), выделение характерных типов освоения и присущих каждому из них спектров трансформаций рельефа. Под спектром трансформаций рельефа в контексте данного исследования понимается, прежде всего, комплекс изменений геоморфологических процессов вследствие антропогенного воздействия.

Материалы и методы исследования. Для районирования исследуемой территории и выделения характерных типов освоения выполнена инвентаризация антропогенных объектов с использованием данных открытых источников, а также в отдельных случаях путем дешифрирования космических снимков высокого разрешения, доступных на публичных интернет-порталах и не требующих специальной лицензии для использования. Учтены следующие типы объектов: населенные пункты (большие и крупные города, малые и средние города, поселки и сельские поселения), дорожная сеть (железные дороги, автодороги с твердым покрытием, грунтовые дороги, туристические тропы), трубопроводная инфраструктура (существующие магистральные нефте- и газопроводы), морские и речные порты, месторождения полезных ископаемых (в т. ч. отдельно разрабатываемые открытым способом), ареалы лесозаготовки, военные объекты или милитаризованные ландшафты, свалки различного рода. Позиции населенных пунктов получены по данным OpenStreetMap (OSM) [OpenStreetMap ... <http://openstreetmap.ru/#map=3/62/88>], где все поселения разделены в следующие классы: 1) city (населенный пункт с населением более 100 000 человек), 2) town (от 100 000 до 10 000 человек), 3) village (от 10 000 до 1 000 человек), 4) hamlet (менее 1 000 человек). Доступные для загрузки в одном из распространенных форматов ГИС-приложений данные OSM могут быть скачаны, например, здесь [Geofabrik ... <http://download.geofabrik.de/>]. Местоположения портов получены с использованием официального Реестра морских портов [Реестр ... http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/reestr_mp.html] и Реестра речных портов [Перечень ... <http://www.morflot.ru/deyatelnost/>

http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/perechen_rechnyh_portop.html]. Сведения о месторождениях ископаемых ресурсов (в большинстве своем, разрабатываемых) взяты в Государственном кадастре месторождений и проявлений полезных ископаемых Росгеолфонда [Государственный кадастр ... <https://www.rfgf.ru/gkm/>]. Открытые разработки полезных ископаемых, в основном, карьеры, дублирующие объекты из кадастра месторождений, извлечены из OSM, как и объекты дорожной сети. Извлечена информация о дорогах следующих типов (в классификации OSM, соответствующей североамериканской системе дорожной номенклатуры [Highway ... https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/highway_functional_classifications/]): дороги с твердым покрытием (1 – trunk (категория IB согласно [ГОСТ ..., 2005]), 2 – primary (категория II), 3 – secondary (категория III), 4 – tertiary (категория III), 5 – residential (улицы в населенных пунктах), 6 – unclassified (дороги с твердым покрытием, относящиеся к категориям IV и V)), грунтовые дороги (7 – track), а также пешеходные туристские и прочие тропы (8 – path). Магистральные газо- и нефтепроводы оцифровывались со схем развития транспортной или инженерной инфраструктуры соответствующих субъектов Российской Федерации – Мурманской области [Архитектура ... <https://minstroy.gov-murman.ru/activities/arhitektura/>], Республики Карелия [Схема ... <http://old.gov.karelia.ru/Power/Committee/Build/Plan/index.html>], Архангельской области [Схема ... <https://old.dvinaland.ru/region/map/>], Ненецкого [Проект схемы ... <http://gkh.adm-nao.ru/arhitektura-i-gradostroitelstvo/strategicheskoe-planirovanie/proekt-shemy-territorialnogo-planirovaniya-nenetskogo-avtonomnogo-okrug/>] и Ямало-Ненецкого [Схема ... <https://www.yanao.ru/activity/1530/>] автономных округов, Красноярского края [Схемы ... <http://minstroy.krskstate.ru/graddoc/terrplan/0/id/25663>] и Республики Саха [Проект ... <https://minstroy.sakha.gov.ru/proekt-shemi-territorialnogo-planirovaniya-rs>]. На отдельных участках территории положение трубопроводных трасс уточнялось по снимкам Landsat [Landsat ... <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>] / Copernicus [Homepage ... <https://www.copernicus.eu/en/>], интерфейс доступа к которым представляет приложение Google Earth Pro [Google ... <https://www.google.com/intl/ru/earth/>]. Позиции ареалов лесозаготовки дешифрированы по упомянутым выше космическим снимкам, с уточнениями по результатам полевых исследований авторов во всех выделенных субъектах РФ. Наибольшие трудности возникли при сборе информации о местоположении милитаризованных объектов. Очевидно, удалось собрать лишь часть этой информации, причем только открытую широкой публике – а это, прежде всего, места известных военных испытаний, например, полигон испытания мощнейшей термоядерной бомбы – Царь-Бомбы – на о-ве Северный архипелага Новая Земля. Конкретные контуры этих полигонов взяты из базы OSM. Информация о скоплениях металлолома в Арктике представлена по данным [Экологический атлас ...,

2017]. Антропогенные объекты прочих типов (например, одиночно стоящие избы-зимовья, хижины рыбаков, отдельные точечные объекты в пределах ООПТ) в рамках представленного исследования не рассматривались, так как занимаемые ими площади крайне малы, а роль в трансформации рельефа незначительна. Собранные сведения систематизированы в базе данных с использованием свободной кроссплатформенной геоинформационной системы Quantum GIS. Общее количество учтенных объектов разных типов, их протяженность и площади представлены в табл. 1.

Очевидно, что некоторые типы антропогенных объектов функционально связаны друг с другом, располагаются в пределах единой территории и при этом относятся к разным видам природопользования (например, автомобильные дороги и поселения). Некоторые антропогенные объекты вполне могли бы быть отнесены к нескольким типам одновременно, например, военные свалки металлического мусора вполне могут быть отнесены к милитаригенным ландшафтам. В последний тип, однако, включались, прежде всего, полигоны испытаний оружия [Khalturin et al., 2005].

После создания серии слоев в ГИС, содержащих информацию о местоположении разных типов антропогенных объектов, по сетке с размером ячеек 10-10 км рассчитывались, в зависимости от конкретного типа объекта, длины линий, число условно «точечных» объектов или площадь в ячейке (для карьеров и военных полигонов). Размер ячейки подобран экспериментальным путем с учетом плотности объектов таким образом, чтобы встречающиеся значения числа объектов в ячейке не были

слишком малы и, в то же время, чтобы дискретность (мозаичность) полученных данных не снижала информативности итоговой карты. Общее количество созданных ячеек – 39 562 шт., а покрытая ими территория – почти 4 млн км².

Так как контуры разных типов природопользования (селитебного, промышленного, транспортно-логистического и др.) накладываются друг на друга в пространстве, не представляется возможным покрыть территорию Арктики планарной сеткой из таких контуров, отнеся каждый конкретный участок лишь к одному из типов. В связи с этим, применен принципиально иной подход: выделены характерные сочетания или комбинации в пространстве разных типов антропогенных объектов. Некоторые типы создают собственную комбинацию (кластер) или же, наравне с другими типами объектов, характеризуют кластеры комплексного освоения территории. В то же время, некоторые типы объектов могут самостоятельно не выделять никаких группировок ячеек.

Все данные прошли процедуру предобработки (а именно, стандартизацию и центрирование [Pyle, 1993]) по причине того, что для исходных типов объектов сильно разнилось их общее число и плотность по ячейкам. В частности, к примеру, различие в числе месторождений – одно или пять – оказывало бы на результат кластеризации большее влияние, чем различие в числе крупных городов в ячейке – ноль или один. А это, очевидно, неверно по смыслу: крупный город (>250 000 человек) трансформирует ландшафт в значительно большей степени, чем модальное из трех тысяч арктических месторождений, часть из которых к тому же закон-

Таблица 1

Антропогенные объекты Арктической зоны России, учтенные при районировании

Тип	Объекты	Количество	Единицы измерения
Населенные пункты	Большие и крупные города (более 50 000 жителей)	8	шт.
	Малые и средние города	56	шт.
	Поселки и сельские поселения	313	шт.
Порты	Морские	14	шт.
	Речные	5	шт.
Месторождения полезных ископаемых	Всего	3 003	шт.
	из них карьеры	525	шт.
	общей площадью	605	км ²
Дорожная сеть	Железные дороги	6 690	км
	Автомобильные дороги с твердым покрытием	43 340	км
	Грунтовые дороги	26 015	км
	Туристические тропы	6 015	км
Магистральные трубопроводы (при следовании в едином коридоре учтена общая длина коридора)	Нефтепроводы	1505	км
	Газопроводы	4 880	км
Крупнейшие ареалы лесозаготовки	Районы складирования древесины и продуктов ее переработки	5	шт.
Военные объекты (в т. ч. милитаригенные ландшафты)	Территории военных частей, полигоны испытаний оружия и др.	218	шт.
		970	км ²
Свалки	Участки нагромождения преимущественно бытовых отходов	214	шт.

сервированы. Статистическая обработка (кластерный анализ) выполнена в свободной программной среде вычислений с открытым исходным кодом на языке программирования R.

Из всей совокупности проанализированных ячеек в 32 590 (или на территории площадью 3,3 млн км²) антропогенные объекты указанных типов отсутствуют. Оставшиеся чуть менее 7000 ячеек (700 тыс. км²) содержат минимум один антропогенный объект минимум одного типа. Таким образом, все ячейки итоговой модели можно расположить в 15-мерном пространстве признаков, в начале координат которого обособится главный (по площади) кластер неизменных территорий российской части Арктики. Во все стороны от центра оставшиеся 7000 ячеек распределятся в зависимости от комбинаций антропогенных объектов. Более похожие по набору объектов участки (и соответствующие им ячейки) составят ядра кластеров, менее похожие – «спорные» – участки так или иначе будут отнесены к какому-то из основных кластеров, расстояние в пространстве признаков до которого окажется меньше.

Использованный нами метод кластеризации – широко распространенный метод *k-means* [Wu, 2012]. Это вероятностный метод, что определяет некоторые его достоинства и недостатки на фоне детерминистических методов иерархической кластеризации (например, по методу Варда [Ward, 1963]). Достоинство метода *k-means* – возможность кластеризации больших наборов данных. При применении же иерархической кластеризации требуется вычисление статистических дистанций «от каждого объекта до каждого другого» [Ward, 1963] в пространстве признаков. В нашем случае это предполагает расчет таблицы из 1,6 млрд статистических дистанций, что лимитируется доступными вычислительными мощностями. Недостаток метода *k-means* – возможное нахождение локального оптимума разбиения на кластеры, но не глобального (наилучшего из теоретически возможных вариантов). Эта проблема в значительной степени устраняется

многократным (в нашем случае – до 1000 раз) пересчетом кластеров для одних и тех же объектов и принятием в качестве достоверного разбиения наиболее часто повторяющегося результата. Кроме того, если по дереву иерархической кластеризации часто можно увидеть наиболее убедительное число группировок-кластеров (отдельные крупные ветки «деревя»), то при классификации методом *k-means* исследователь всегда сам выбирает предполагаемое число естественных группировок объектов.

Существуют различные способы более или менее объективного выбора числа кластеров. Основаны они чаще всего на том, как меняется доля многомерной дисперсии внутрикластерной и общей или междукластерной (иногда – с поправкой на число кластеров). По существу, наиболее грубое разбиение – на два кластера – проще всего интерпретируется. Наиболее тонкое разбиение, когда каждый объект представляется в виде отдельного кластера, совершенно не интерпретируемо и бессмысленно. Суть методов выбора оптимального числа кластеров состоит в том, чтобы соблюсти баланс между информативностью и интерпретируемостью результата.

При выборе числа кластеров в рамках выполненного исследования были использованы два самостоятельных метода. Первый из них – «метод локтя» или «метод колена» (*the «elbow» method* по [Thorndike, 1953]). При его применении внутри выделенных сгустков точек в пространстве признаков рассчитывается сумма квадратов отклонений всех точек от геометрического центра кластера (суммарная внутрикластерная изменчивость). Чем больше выделяется группировок, тем точнее удастся учесть структуру облака точек в пространстве признаков, например, исчезают «сборные» кластеры из двух разнородных облаков точек, разделенных пустым пространством – они просто разбиваются на два отдельных сгустка точек. Этот параметр (по сути, схожий с внутрикластерной многомерной дисперсией) рассчитывался при разном количестве потенциальных кластеров – от 2 до 15 (рис. 1).

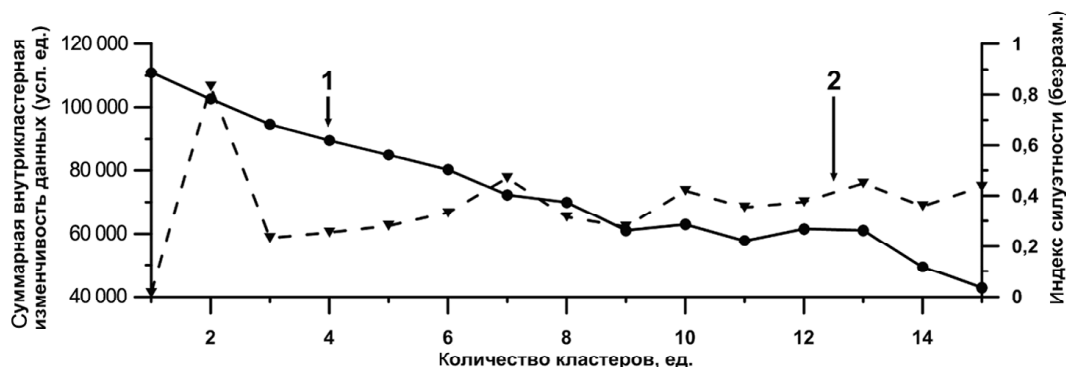


Рис. 1. Значения критериев оптимального количества кластеров антропогенных объектов в Российской Арктике: 1 – метод локтя, 2 – критерий силуэтности

Fig. 1. Values of criteria for defining the optimal clusters numbers for anthropogenic objects in the Russian Arctic: 1 – elbow method, 2 – silhouette criterion

Оптимальным следует признать такое разбиение на кластеры, при котором кривая на переходе от числа кластеров X к числу $X+1$ уходит вниз под более резким углом, нежели обычно. В выполненном расчете это число кластеров – четырнадцать, однако, такое количество групп анализируемых объектов трудно поддается интерпретации. Первый – при относительно небольшом числе кластеров – перегиб соответствует $X=7$. Нужно подчеркнуть, что здесь и далее речь идет о разбивке только данных, содержащих ненулевые значения, т. е. нулевые ячейки (арктические территории, где антропогенные объекты отсутствуют) выводятся в отдельный класс по умолчанию.

Второй используемый способ выбора оптимального числа кластеров – метод силуэта (или «silhouette» по [Rousseeuw, 1987]). При использовании этого метода сравниваются статистическая дистанция каждого объекта до центра своего кластера и до совокупного или индивидуальных центров всех прочих кластеров. Численно результат применения данного теста (показатель силуэтности) изменяется от минус 1 до 1, где единице соответствует идеальное разбиение, а структуре данных – совершенная кластерность (например, когда существует несколько групп, состоящих из полностью идентичных объектов каждая), минус единице соответствует предельно несовершенное разбиение, хаотичное назначение кластеров объектам в пространстве признаков.

Тестируемое число кластеров также было выбрано в интервале от 2 до 15 (см. рис. 1). На рисунке 1 видно, что ближайшее к единице значение (0,83) критерий принимает при количестве кластеров равном 2, т. е. с учетом фоновых нетронутых территорий – 3. Это минимальное обоснованное число кластеров. Визуальная интерпретация пространственной мозаичности трех кластеров позволяет сделать вывод, что выделенные группировки – фон, участки с одним или двумя типами землепользования и участки с несколькими (чаще 5–7) типами землепользования. Последние приурочены к окрестностям городов и поселков. Этот результат, при том, что он наиболее надежен, совершенно тривиален. Из оставшихся значений максимум силуэтности (0,46) достигается при числе кластеров = 7(+1). Конкурирующие наборы кластеров – 13, 15 и 10, однако, с учетом их большего числа и даже немного меньшей информативности, по принципу бритвы Оккама, не нуждаются в рассмотрении. Заметим, что итоговый оптимум числа кластеров – 7, выбран по итогам применения двух методов (метода «локтя» и метода силуэта).

Таким образом, выделено 8 кластеров (семь комбинаций и кластер нетронутых территорий), отличающихся характерными комбинациями антропогенных объектов (табл. 2). Центр каждого из них имеет собственные координаты в 15-мерном пространстве признаков (по числу типов объектов). Для качественной содержательной интерпретации выделенных кластеров было оценено относительное положение их центров вдоль каждой из 15 осей. Если

какой-либо кластер более чем на одно среднеквадратическое отклонение выделяется (в положительную сторону) на фоне остальных вдоль одной или нескольких осей – принималось, что данный кластер выделен именно вследствие отличий его от остальных по соответствующему типу объектов. Отклонение каких-либо кластеров на фоне остальных в отрицательную сторону нами не рассматривалось. Если такое отклонение есть, то интерпретироваться оно должно следующим образом: «данный кластер выделен как самостоятельный по причине отсутствия (!), а не наличия, на соответствующих кластеру территориях некоторых типов объектов», что довольно бессмысленно, если речь идет о комбинациях антропогенных объектов как маркерах типов природопользования.

Результатом инвентаризации объектов антропогенной инфраструктуры на территории стала мелкомасштабная карта типов территорий по характеру антропогенного освоения (рис. 2).

Результаты исследования и их обсуждение. На основании собранных и систематизированных данных об антропогенной инфраструктуре можно, прежде всего, оценить степень освоения территории субъектов Российской Федерации, частично или полностью входящих в Арктическую зону. В масштабе исследования выделены четыре типа территорий с характерными долями незатронутых воздействием площадей: 1) территории, где не затронуты воздействием менее 25% от площади субъекта (к этому типу относится только Республика Карелия); 2) то же от 25 до 50% (Мурманская область, Республика Коми); 3) то же от 50 до 75% (Архангельская область, Ямало-Ненецкий АО); 4) то же более 75% (Ненецкий АО, Красноярский край, Республика Саха, Чукотский АО). Наибольшая доля неосвоенных территорий от площади субъекта характерна для Красноярского края и составляет 95,2% (табл. 3). Островные территории, если рассматривать их отдельно от субъекта РФ, к которому они относятся, могут характеризоваться степенью освоенности, отличной от материковой части, причем в меньшую сторону.

В более крупном масштабе (см. рис. 2, врезки) выполнена оценка распространения разных типов освоения (от 1 до 7) в пределах Арктической зоны России. Поскольку разные типы хозяйственной деятельности оказывают различное прямое и косвенное воздействие на развитие рельефа, данная оценка позволяет установить характерные типы этих трансформаций в пределах отдельно взятых территорий. В частности, в областях преобладающего транспорта углеводородов существует определенный набор характерных воздействий на рельеф: прямое сводится к созданию выемок и насыпей, противозрозионных валов и плотин; а косвенное воздействие включает изменение растительного покрова и температурных условий многолетнемерзлых пород (прежде всего, растепление) в притрассовой полосе, формирование толщи техногенных отложений в траншее. Таким районам свойственен опре-

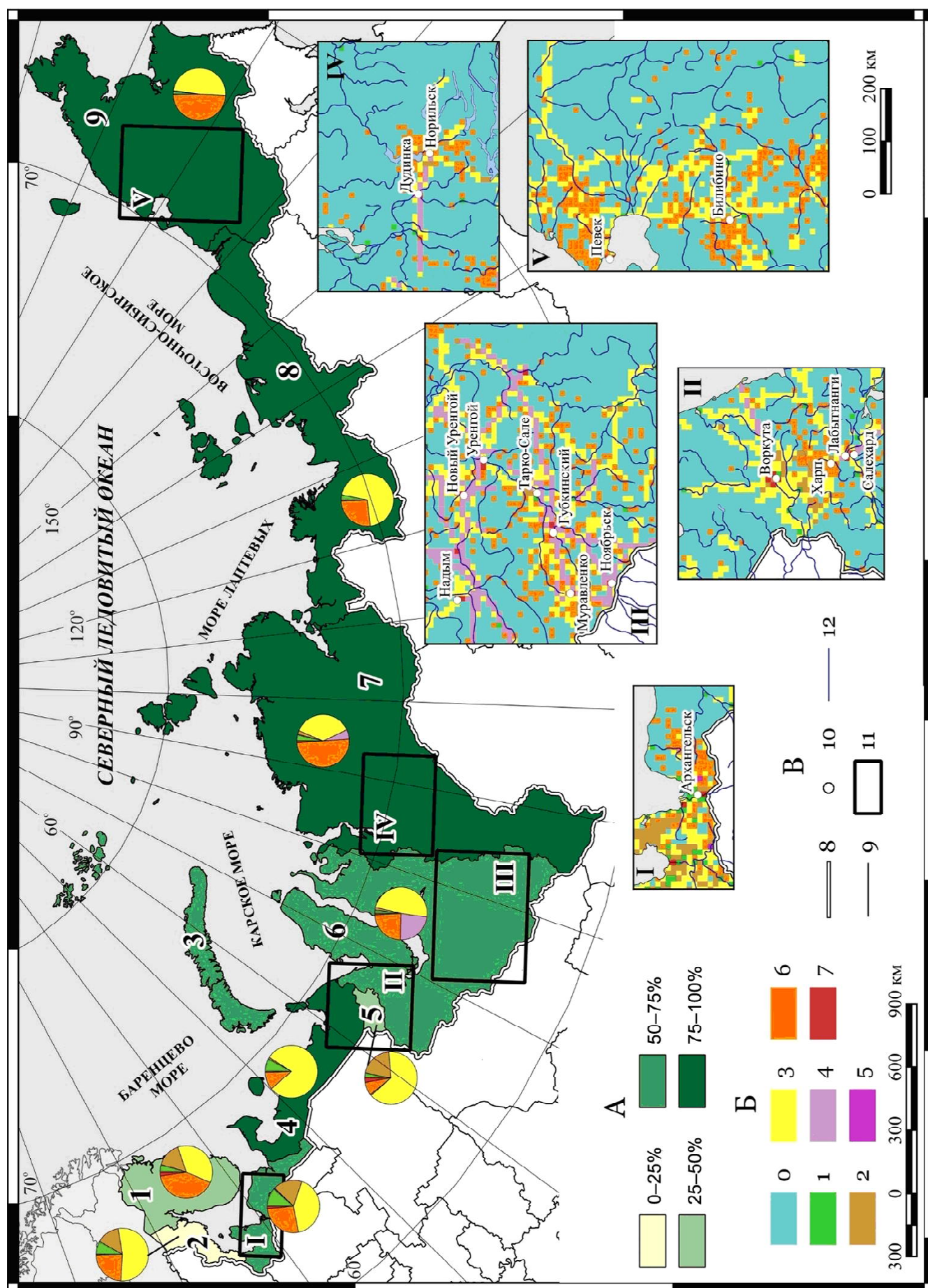
Таблица 2

Комбинации антропогенных объектов в выделенных кластерах и характерные воздействия на рельеф

Кластер (ведущий тип освоения)	Характерная комбинация антропогенных объектов	Площадь, тыс. км ²	Местоположение крупнейших ареалов	Прямое воздействие на рельеф	Косвенное воздействие на рельеф
1	2	3	4	5	6
0	Антропогенные объекты отсутствуют (согласно имеющимся у нас данным в выбранном масштабе)	3 260	Малоземельская тундра, большая часть арктических архипелагов, Таймыр, прибрежная полоса от района Тикси до устья Колымы, восточная часть Кольского п-ова	Отсутствует	Изменение растительного покрова на участках пастбищ, локально (на участках временных стоянок) – замусоривание и нарушение почвенно-растительного покрова. Последствия: на отдельных малых по площади участках активизируются процессы делювиального смыва и солифлюкции, бороздовой эрозии.
1	Поселки, военные объекты	28	Рассеянный кластер (небольшие по площади участки)	Выравнивание (уничтожение микро- и нанорельефа), террасирование склонов, создание насыпей и выемок. Последствия: формирование ареалов подтопления и заболачивания, солифлюкция и оползни на склонах выемок, пучение на насыпях (при неграмотном устройстве).	Изменение поверхностного стока (создание дренажных сооружений, сброс сточных вод), изменение температурного режима многолетнемерзлых пород (растепление, новообразование мерзлоты), сведение или нарушение растительного покрова, на участках насыпей – формирование толщ техногенных грунтов. Последствия: активизация термоэрозии в МЭФ и термокарста, активизация бороздовой эрозии, пучение на насыпях (при неграмотном устройстве).
2	Грунтовые дороги	34	Преимущественно в окрестностях крупных городов с развитым пригородным расселением	Появление дорожных, в т. ч. колесных, выемок, реже – устройство насыпей и кюветов. Последствия: активизация термоэрозии в МЭФ ниже водопропускных сооружений, реже – термокарста, подтопление и заболачивание выше насыпи на пологих склонах, линейной эрозии по колеям и кюветам, дефляция в бесснежное время.	Изменение поверхностного стока (концентрация стока в водопропускных сооружениях и кюветах), изменение температурного режима многолетнемерзлых пород (растепление, новообразование мерзлоты), сведение или нарушение растительного покрова.
3	Дороги с твердым покрытием	355	Развитая сеть в северной Карелии, на западе Мурманской и Архангельской областей, на севере Западной Сибири и Чукотского АО	Создание дорожных выемок и насыпей, кюветов. Последствия: активизация термоэрозии в МЭФ ниже водопропускных сооружений, термокарста, подтопление и заболачивание выше насыпи на пологих склонах, линейной эрозии по кюветам, локально – пучение на участках снятия или нарушения почвенно-растительного покрова (торфяного слоя).	Изменение поверхностного стока (концентрация стока в водопропускных сооружениях и кюветах), изменение температурного режима многолетнемерзлых пород (растепление в притрассовой полосе), сведение или нарушение растительного покрова, на участках насыпей – формирование толщ техногенных грунтов.

Продолжение табл.2

1	2	3	4	5	6
4	Магистральные трубопроводы	46	Почти исключительно в пределах Печорской и Западно-Сибирской низменностей	Создание противозрозионных и прочих валиков, в редких случаях – выемок. Создание плотин на участках переходов. Последствия: изменение направления стока поверхностных вод на склонах, заболачивание, подтопление и термокарст выше по течению на участках перехода через флювиальные формы (при надземной прокладке в теле плотин).	Изменение растительного покрова (нарушение сплошности, удаление органических грунтов) и температурных условий многолетнемерзлых пород (растепление) в притрассовой полосе, формирование толщ техногенных отложений в траншее. Последствия: активизация термокарста и пучения в притрассовой полосе, развитие суффозии в грунтах обратной засыпки, дефляция на участках нарушения почвенно-растительного покрова, активизация термоэрозии ниже водопропускных сооружений в теле плотин.
5	Районы лесозаготовки и железные дороги	0,5	Локальные участки в Мурманской и Архангельской обл., окрестности г. Игарка	Создание дорожных (в т. ч. железнодорожных) насыпей и выемок, антропогенных форм из продуктов переработки древесины. Последствия: активизация термокарста, подтопления и заболачивания, линейной эрозии по колеям и кюветам, дефляция, в т. ч. продуктов переработки древесины (древесные опилки и пыль).	Уничтожение лесной растительности, изменение температурного режима многолетнемерзлых пород (растепление), появление специфических техногенных отложений (продукты переработки древесины). Последствия: Широкомасштабное развитие подтопления, заболачивания, термокарста и термоэрозии, местами – усиление пучения грунтов в результате снятия торфяного слоя, дефляция, увеличение стока наносов водотоков и образование флювиальных форм из техногенных отложений.
6	Месторождения полезных ископаемых (включая карьеры), свалки	230	Центр и запад Кольского п-ова, в меньшей степени – Карелия, рассеянные очаги – в пределах Печорской и Западно-Сибирской низменностей, Чукотский АО.	Широкомасштабное создание антропогенных форм (насыпи и выемки дорог, карьеры, рвы, канавы и кюветы, отвалы, искусственные русла и пр.). Полное изменение естественного рельефа на участках открытой горнодобычи. Последствия: изменение направления и интенсивности потоков вещества (воды, наносов), а именно: изменение баланса наносов и гидрологического режима в руслах постоянных и временных водотоков, изменение естественного спектра и интенсивности склоновых процессов (в т. ч. появление обширных ареалов развития обвально-осыпных и оползневых процессов), активизация термоэрозии, заболачивания, подтопления и термокарста (последнего – на прилегающих участках), активизация дефляции и увеличение интенсивности морозного выветривания.	Практически полное уничтожение (для открытых разработок) или существенное изменение растительного покрова, изменение объемов и режима стока (в т. ч. наносов) во флювиальной сети, изменение температурного режима многолетнемерзлых пород (растепление, новообразование мерзлоты), появление больших объемов техногенных грунтов.
7	Комплексное освоение (дороги с твердым покрытием, пешеходные тропы, железные дороги, города, порты)	7	Окрестности крупнейших городов, портов	Создание широкого спектра антропогенных форм (насыпи, выемки, искусственные террасы, дренажные сооружения, плотины, причальные и берегозащитные конструкции на берегах и пр.). Последствия: снижение интенсивности флювиальных процессов (в городской черте), активизация дефляции, термокарста и термоэрозии в МЭФ, активизация оползневых процессов, локально – активизация процессов пучения и суффозии. Изменение характера и интенсивности береговых процессов. Усиление морозного выветривания (прежде всего, в результате увеличения мощности сезонно-талого слоя).	Полное изменение, а местами сведение, растительного покрова. Изменение температурного режима многолетнемерзлых грунтов, изменение баланса (объемов и режима) грунтовых вод, значительная нагрузка склонов, широкое распространение техногенных отложений, перевод части поверхностного стока в подземный.



деленный набор последствий антропогенного вмешательства с точки зрения развития рельефа и геоморфологических процессов, а именно: изменение направления стока поверхностных вод на склонах, заболачивание, подтопление и термокарст выше по течению на участках перехода через флювиальные формы (при надземной прокладке в теле плотин) и в притрассовой полосе, дефляция и пр. Составленная карта позволяет оценить ведущие типы трансформации рельефа в пределах каждой из выделенных ячеек и для субъектов РФ в целом. Свойственные каждому из выделенных типов освоения прямые и косвенные воздействия деятельности человека на рельеф и их последствия приведены в табл. 2.

Полученные результаты демонстрируют, что с запада на восток в пределах Арктической зоны происходит не только объяснимое снижение степени освоения, но также меняется и спектр типов освоения (см. круговые диаграммы на рис. 2, а также табл. 3). Наиболее часто встречающимися объектами антропогенной инфраструктуры во всей Арктике являются автомобильные дороги с твердым покрытием, при этом в пределах Карелии, Ненецкого АО, Коми и Якутии это ведущий тип воздействия на более чем половине освоенной территории этих субъектов. Если учитывать еще и грунтовые автодороги, то к названным субъектам присоединятся также Мурманская и Архангельская области. Таким образом, практически на всей территории Арктики, кроме Чукотского АО, Ямало-Ненецкого АО и Красноярского края, автомобильные дороги названных категорий – это наиболее распространенные антропогенные объекты. Западная часть Арктики также отличается от восточной гораздо большей распространенностью не крупных поселков и военных объектов. Наибольшие площади занимают данные объекты в Мурманской и Архангельской областях, а также в Карелии. При этом Мурманская область выделяется наиболее широким (в западной Арктике) распространением объектов горнодобычи, среди которых преобладают открытые горные выработки. Наибольшие же в Арктике площади, затронутые добывающей промышленностью, характерны для Ямало-Ненецкого АО (добыча углеводородов) и Чукотского АО (добыча ценных ме-

таллов и др.). Максимальная доля в спектре типов освоения присуща горнодобыче в пределах Красноярского края, несмотря на малые площади, затронутые данным типом. Спектр типов освоения, присущий Ямало-Ненецкому АО, определяется ресурсным значением региона. Около половины объектов – это разрабатываемые месторождения совместно с объектами транспорта углеводородов, и еще почти половина – это автомобильные дороги, ведущие к месторождениям и прочие. Территории с комплексным освоением (крупные промышленные и селитебные центры и их окрестности) выражаются в масштабе исследования в каждом субъекте РФ. Наибольшие площади они занимают в Европейской части России (Мурманская и Архангельская области, Коми). За Уралом доля таких территорий в общей площади зоны освоения падает вдвое и ниже.

Выявленные закономерности хозяйственного освоения российской Арктики легко объяснимы. Развитие хозяйства в течение столетия продвигалось с запада на восток и в последние десятилетия наиболее активно продолжается в областях ресурсного освоения, прежде всего, углеводородного сырья. Именно поэтому из всех зауральских субъектов Ямало-Ненецкий АО характеризуется наибольшей долей освоенных территорий от площади субъекта, а также наиболее развитой автодорожной сетью. Как показано в таблице 2, транспортные (в том числе, нефте- и газотранспортные) объекты создают определенный комплекс экологических проблем, особенно в криолитозоне. Для этих районов наиболее характерна активизация посткриогенных процессов (термокарст, термоэрозия), наносящая ощутимый ущерб инфраструктуре. Горнодобыча к востоку от Енисея – это, преимущественно, открытые разработки. Поэтому, в сравнении с ЯНАО, воздействие здесь более локально, но зато более существенно (вплоть до полного изменения естественного рельефа), а объемы перемещения материала на единицу площади выше в десятки раз.

Выполненный анализ позволяет выделить наиболее значимые трансформации рельефа и геоморфологических процессов, присущие каждому из субъектов РФ, входящих в Арктическую зону. Для Мурманской области (преобладают объекты горно-

Рис. 2. Степень и типы антропогенного освоения территории Арктической зоны России. Условные обозначения. Доля кластера «территорий без антропогенного освоения» внутри отдельных субъектов административного деления (в %) (А); типы антропогенного освоения по доминирующим типам объектов (Б): 0 – территории без антропогенного воздействия, 1 – поселки и военные объекты, 2 – грунтовые дороги, 3 – дороги с твердым покрытием, 4 – магистральные трубопроводы, 5 – объекты лесохозяйственной промышленности, 6 – горнодобывающее освоение, 7 – комплексное освоение; прочие обозначения (В): 8 – граница Арктической зоны РФ, 9 – границы субъектов РФ, 10 – крупные города и поселки, 11 – границы участков карт-врезок, 12 – крупные реки. Круговые диаграммы характеризуют соотношение различных кластеров антропогенного освоения (кластеры 1–7) между собой внутри конкретного субъекта

Fig. 2. The degree and types of land development in the Arctic zone of Russia. Legend. The percentage of the «territories without anthropogenic impact» cluster within individual administrative subjects of Russia (in %) (A); types of land development according to the dominant types of anthropogenic objects (B): 0 – territories without anthropogenic impact, 1 – villages and military settlements, 2 – unpaved roads, 3 – paved roads, 4 – trunk pipelines, 5 – forestry objects, 6 – mining, 7 – integrated development; other signs and symbols (B): 8 – the border of the Arctic zone of the Russian Federation, 9 – the borders of the subjects of the Russian Federation, 10 – large cities and towns, 11 – the boundaries of the inset maps, 12 – large rivers. Pie charts characterize the ratio of different clusters of land use (clusters 1–7) within a particular subject

Таблица 3

**Распространение выделенных типов антропогенного освоения в пределах Арктической зоны России
(по субъектам РФ)**

Субъект РФ	Неосвоенные территории*	Ведущий тип хозяйственного освоения**							Площадь субъекта в пределах АЗ РФ (тыс. км ²)
		1	2	3	4	5	6	7	
Мурманская область	44,7/64,54	4,4/3,49	15,2/12,17	36,7/29,37	–	0,1/0,10	41,0/32,78	2,5/2,01	144,456
Республика Карелия	13,1/5,63	8,2/3,06	14,2/5,33	53,4/20,00	–	–	23,6/8,85	0,5/0,18	43,040
Архангельская область	74,1/134,68	11,6/5,48	17,9/8,43	41,6/19,58	–	0,6/0,30	26,4/12,42	1,7/0,80	181,696
Ненецкий АО	79,3/142,75	8,0/2,99	1,0/0,38	79,7/29,67	–	–	10,6/3,94	0,6/0,22	179,950
Республика Коми	41,9/10,90	3,1/0,47	20,6/3,10	65,0/9,80	0,7/0,10	–	8,0/1,20	2,6/0,40	25,696
Ямало-Ненецкий АО	73,4/511,86	2,0/3,79	1,6/3,00	48,5/90,04	23,2/43,00	–	23,8/44,23	0,9/1,60	697,517
Красноярский край	95,2/1030,41	3,9/2,00	2,3/1,20	36,6/18,77	5,8/3,00	0,02/0,10	50,1/25,71	1,1/0,55	1081,738
Республика Саха (Якутия)	87,2/520,93	3,2/2,46	–	70,0/53,40	–	–	26,2/19,97	0,6/0,45	597,213
Чукотский АО	80,9/581,85	1,6/2,15	0,5/0,75	48,6/66,72	–	–	49,0/67,22	0,2/0,29	718,989

* Слева – процент от общей площади субъекта, справа – площади в тыс. км².

** Слева – процент от общей площади освоенных территорий, справа – площади в тыс. км² (приводятся площади ячеек, в пределах которых данный тип освоения является определяющим).

добычи и дорожная сеть) на первый план выходит прямое воздействие, выражающееся в широкомасштабном создании антропогенных форм рельефа и активизации геоморфологических процессов, многие из которых в естественных условиях в регионе слабо развиты или вовсе не развиты (обвалы и осыпи, скальные оползни, подтопление, заболачивание и пр.). Похожая ситуация наблюдается также в Красноярском крае и Чукотском АО. В Карелии и Архангельской области основное воздействие выражается в изменении поверхностного стока линейными объектами инфраструктуры (прежде всего, дорожной сетью). Как следствие, активизируются подтопление и заболачивание. Однако роль объектов горнодобычи и лесозаготовки в этих районах также значима, в отличие от Ненецкого АО и Коми, представляющих собой, преимущественно, «транспортные» регионы. В Ямало-Ненецком АО на первое место выходят трансформации рельефа, связанные с развитием посткриогенных процессов, поскольку преобладающие здесь линейные объекты инфраструктуры существенно влияют на поверхностный сток. Поэтому основные проблемы региона – термокарст, термоэрозия, подтопление и заболачивание. Трансформация рельефа в пределах Республики Саха (Якутия) в результате антропогенного воздействия связана, прежде всего, с устройством

автомобильных дорог, что в условиях наличия мерзлоты и весьма расчлененного рельефа, безусловно, стимулирует не только посткриогенные процессы, заболачивание и подтопление, но также активизирует склоновые процессы (оползни, обвалы и осыпи, солифлюкцию и пр.).

Выводы. На основании выполненного кластерного анализа объектов антропогенной инфраструктуры в Арктике и интерпретации его результатов можно сделать следующие основные выводы:

– лишь 18% территории российской Арктики затронуты хозяйственным освоением, а на остальной ее части объекты антропогенной инфраструктуры отсутствуют. Трансформация рельефа и спектра естественных геоморфологических процессов затрагивает, таким образом, общую площадь около 667 тыс. км²;

– в пределах Арктической зоны России выделены шесть основных типов освоения, каждый из которых характеризуется доминированием определенного типа антропогенных объектов (селитебных объектов, автодорог разных категорий, объектов горнодобывающей отрасли, объектов транспорта углеводородов, инфраструктуры лесозаготовки). Также выделяется особый тип освоения – комплексное освоение, для которого характерно сочетание от трех до пяти выделенных типов на ограниченной площади;

– степень хозяйственной освоенности арктических территорий закономерно снижается с запада на восток (с 87% в Республике Карелия до 19% в Чукотском АО и 5% в Красноярском крае);

– в зависимости от присущих типов освоения субъектам РФ, входящим в Арктическую зону, свойственны различные типы трансформации рельефа. Для регионов с ведущей ролью транспортной инфраструктуры (например, Архангельская область, Карелия, Республика Саха) характерно более значимое участие косвенного воздействия человека на развитие рельефа, в сравнении с пря-

мым (негативные последствия активизации опасных геоморфологических процессов в притрассовых полосах объектов инфраструктуры охватывают площади, превышающие площади созданных при освоении антропогенных форм). Для участков преобладания горнодобычи (например, Мурманская область), напротив, наибольшая трансформация рельефа связана с прямым воздействием, прежде всего, широкомасштабным созданием антропогенных форм, а также непосредственным влиянием на ход современных геоморфологических процессов.

Благодарности. Кластерный анализ, обработка его результатов и их интерпретация выполнены при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-05-60200, сбор сведений о влиянии лесохозяйственной деятельности на развитие рельефа выполнен в рамках темы госзадания № АААА-А16-11632810089-5 «Эволюция природной среды, динамика рельефа и геоморфологическая безопасность природопользования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большагин А.Ю., Вялышев А.И., Добров В.М., Долгов А.А., Зиновьев С.В., Олтян И.Ю., Горбатский В.В. Комплексный мониторинг – неотъемлемая часть безопасности Арктической зоны Российской Федерации // Арктика. Экология и экономика. 2014. № 1. С. 48–37.
- Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2001. 262 с.
- ГОСТ Р 52398-2005. Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования. М.: Стандартинформ, 2006.
- Гребенец В.И., Исаков В.А. Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск – Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 2. С. 69–77.
- Деркач А.А. Деформации защитных инженерных сооружений на трассах магистральных газопроводов как результат воздействия экзогенных процессов в условиях Заполярья // Антропогенная геоморфология: наука и практика: материалы XXXII Пленума Геоморфологической комиссии РАН (г. Белгород, 25–29 сентября 2012 г.). М.; Белгород: ИД «Белгород», 2012. С. 34–39.
- Дмитриев В.Г. Полуэмпирический метод оценки экологического риска шельфовой и прибрежной Арктической зоны для ключевых арктических районов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 4. С. 96–103.
- Ельчанинов Е.А. Основные направления инженерных решений для охраны природных комплексов при промышленном освоении Северных территорий // Горн. инф.-анал. бюл. Отд. вып. 1. Труды Междунар. науч. симпозиума «Неделя горняка – 2014». 2014. С. 196–210.
- Зотова Л.И., Королева Н.А., Дедюсова С.Ю. Оценка и картографирование кризисных экологических ситуаций на территориях газопромышленного освоения в криолитозоне // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2007. № 3. С. 54–59.
- Зотова Л.И., Тумель Н.В. Методология выбора природоохранных мероприятий в области вечной мерзлоты на примере Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Проблемы региональной экологии. 2018. № 1. С. 93–98.
- Кожухов И.В., Фирсов Ю.Г., Гордиенко Н.Ю. Северный регион Российской Федерации как зона экологического риска и новый технологический этап освоения Арктики // Эксплуат. мор. трансп. 2013. № 2. С. 73–78.
- Козлова А.Е. Антропогенное преобразование рельефа в условиях хозяйственного освоения территории полуострова Ямал // Изв. РАН. Сер. географическая. 2013. № 4. С. 87–94.
- Кочуров Б.И., Зотова Л.И., Тумель Н.В. Экодиагностика опасных геоэкологических ситуаций при хозяйственном освоении криолитозоны // Проблемы региональной экологии. 2015. № 4. С. 157–164.
- Марахтанов В.П. Инженерно-географические исследования на трассах магистральных газопроводов в криолитозоне // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 4. С. 42–47.
- Питулько В.В. Жоховская стоянка. СПб.: Дмитрий Буланин, 1998. 189 с.
- Романенко Ф.А. Геоморфологические опасности на арктических островах и побережьях // Геоморфология и картография: Материалы 33 Пленума геоморфологической комиссии РАН. Саратов, 17–11 сент. 2013. Саратов, 2013. С. 234–237.
- Сафьянов Г.А., Репкина Т.Ю. Факторы динамики берегов Унской губы (Летний берег Белого моря) // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 4. Факторы глобальных изменений. М., 2012. С. 392–400.
- Тумель Н.В., Зотова Л.И., Стрелецкая И.Д. Опасные криогенные процессы по трассе газопровода Ямал–Воркута: геоэкологическая оценка, мониторинг // Народное хозяйство Республики Коми. 2005. Т. 14. № 3. С. 278–283.
- Хлобыстин Л.П. Древняя история Таймырского Заполярья и вопросы формирования культур Севера Евразии. СПб.: Дмитрий Буланин, 1998. 340 с.
- Чеснокова И.В. Антропогенный морфогенез в зоне развития многолетнемерзлых пород // Антропогенная геоморфология. М.; Киев: Медиа-ПРЕСС, 2013. С. 167–173.
- Шполянская Н.А., Зотова Л.И. Экологическая безопасность Российского Севера // Экология и промышленность. 1999. № 9. С. 12–18.
- Экологический атлас России / А.Х. Аджиев, С.А. Барта-лѳв, М.Ю. Беккиев и др. М.: Феория, 2017. 510 с.
- Khalturin V.I., Rautian T.G., Richards P.G., Leith W.D. A review of nuclear testing by the Soviet Union at Novaya Zemlya, 1955–1990 // Science and Global Security. 2005. № 13. P. 1–42.
- Pyle D. Data preparation for data mining. Morgan Kaufmann, 1993. 467 p.
- Rousseeuw P.J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis // Computational and Applied Mathematics. 1987. № 20. P. 53–65.
- Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Grebenets V.I., Luis S. Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia // Polar Geography. 2017. № 40(4). P. 273–290.
- Thorndike R.L. Who Belongs in the Family? // Psychometrika. 1953. № 18(4). P. 267–276.
- Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // Journal of the American Statistical Association. 1963. № 58:301. P. 236–244.

Wu J. Advances in k-means clustering: a data mining thinking. Springer, 2012. 180 p.

Электронные ресурсы:

Архитектура и градостроительство. Министерство строительства и территориального развития Мурманской области [Электронный ресурс]: URL: <https://minstroy.gov-murman.ru/activities/arhitektura/> (дата обращения 06.03.2019).

Государственный кадастр месторождений и проявлений полезных ископаемых – Российский Федеральный Геологический Фонд [Электронный ресурс]: URL: <https://www.rfgf.ru/gkm/> (дата обращения: 05.03.2019).

Перечень речных портов [Электронный ресурс]: URL: http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/perechen_rechnyih_portov.html (дата обращения 04.03.2019).

Проект схемы территориального планирования Ненецкого автономного округа (изменения 2017 года) [Электронный ресурс]: URL: <http://gkh.adm-nao.ru/arhitektura-i-gradostroitelstvo/strategicheskoe-planirovanie/proekt-shemy-territorialnogo-planirovaniya-nenetskogo-avtonomnogo-okrug/> (дата обращения: 09.03.2019).

Проект Схемы территориального планирования РС(Я) [Электронный ресурс]: URL: <https://minstroy.sakha.gov.ru/proekt-shemi-territorialnogo-planirovaniya-rs/> (дата обращения 12.03.2019).

Реестр морских портов [Электронный ресурс]. URL: http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/reestr_mp.html (дата обращения 03.03.2019).

Схема территориального планирования Архангельской области [Электронный ресурс]: URL: <https://old.dvinaland.ru/region/map/> (дата обращения 08.03.2019).

Схема территориального планирования Ямало-Ненецкого автономного округа [Электронный ресурс]: URL: <https://www.yanao.ru/activity/1530/> (дата обращения 10.03.2019).

Схема территориального планирования. Правительство Республики Карелия [Электронный ресурс]: URL: <http://old.gov.karelia.ru/Power/Committee/Build/Plan/index.html> (дата обращения 07.03.2019).

Схемы территориального планирования Красноярского края [Электронный ресурс]: URL: <http://minstroy.krskstate.ru/graddoc/terrplan/0/id/25663> (дата обращения 11.03.2019 г.).

Geofabrik Download Server [Электронный ресурс]: URL: <http://download.geofabrik.de/> (дата обращения 02.03.2019).

Google Планета Земля [Электронный ресурс]. URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/> (дата обращения 15.03.2019).

Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures [Электронный ресурс]: URL: https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/highway_functional_classifications/ (дата обращения 06.03.2019).

Homepage. Copernicus [Электронный ресурс]: URL: <https://www.copernicus.eu/en> (дата обращения 14.03.2019).

Landsat Science [Электронный ресурс]: URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 13.03.2019).

OpenStreetMap Россия – Карта Online [Электронный ресурс]: URL: <http://openstreetmap.ru/#map=3/62/88> (дата обращения 01.03.2019).

Поступила в редакцию 29.08.2019

После доработки 05.09.2019

Принята к публикации 12.09.2019

**A.V. Bredikhin¹, E.A. Eremanov², S.V. Kharchenko³,
Yu.R. Belyaev⁴, F.A. Romanenko⁵,
S.I. Bolysov⁶, Yu.N. Fuzeina⁷**

REGIONALIZATION OF THE RUSSIAN ARCTIC ACCORDING TO THE TYPES OF ANTHROPOGENIC DEVELOPMENT AND ASSOCIATED RELIEF TRANSFORMATION BY APPLYING THE CLUSTER ANALYSIS

Information about the occurrence of different types of anthropogenic objects, such as settlements, transport infrastructure, mining areas, etc., in the Arctic zone of Russia was collected and systematized. Information about anthropogenic objects was taken from the Internet open sources: cartographic projects, databases, projects and schemes for further development of the subjects of the Russian Federation. It has been established that only a fifth of the Russian Arctic territory is under economic development, while the rest of its territory practically lacks the anthropogenic objects. The degree of economic development of the Arctic territories gradually decreases eastward. The Republic of Karelia is characterized by the highest level of economic development (only 13,1% of its area is currently unaffected by economic activities), while the least developed subjects are the Krasnoyarsk Krai (95,2%) and the Republic of Sakha (Yakutia)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and paleogeography, Head of the Department, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: avbredikhin@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail*: eremenkoeaig@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: xar4enkkoff@yandex.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail*: yrbel@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: faromanenko@mail.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: sibol1954@bk.ru

⁷ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail*: donaiddw@bk.ru

(87,2%). Data on the presence, location, and types of anthropogenic objects underwent the *k-means* method of cluster analysis in order to identify characteristic combinations of objects corresponding to the different types of development. Six main types of development have been identified within the Arctic zone of Russia, each of them is characterized by the dominance of a certain type of anthropogenic objects (residential objects, roads of various categories, mining facilities, fossil fuel transportation objects, and logging infrastructure). A specific type of development, namely integrated development, was also identified, which is characterized by a combination of three to five types of objects within a limited area. Each type of development is characterized by a certain combination of trends and the degree of relief transformation. In particular, the greatest transformation of relief and geomorphological processes is typical of the opencast mining areas (525 quarries with a total area of 605 km²). A large variety of anthropogenic forms of different sizes are forming and the natural course of relief-forming processes (permafrost, fluvial, slope, etc.) is totally disrupted there for long. The least significant impact on relief development is that of some linear transport structures, in particular, unpaved roads and underground gas pipelines. Depending on the types of development, the subjects of the Russian Federation which are the part of the Arctic zone are characterized by various forms of the influence of economic activities on relief development. For regions with the leading role of transport infrastructure (e. g. the Arkhangelsk region, Karelia, the Republic of Sakha), a more significant indirect human influence on relief development is characteristic, in comparison with the direct one (the areas with negative consequences along the pathways of infrastructure objects exceed the area of anthropogenic forms themselves). On the contrary, the most pronounced transformation of relief in mining areas (e. g. the Murmansk region) is associated with direct impact, primarily, the large-scale creation of anthropogenic forms. In general, the economic activity in the Arctic zone of Russia is rather weak: the transformation of relief and natural geomorphological processes affects a total area of about 667 thousand square km, which is about 18% of the total area of the Russian Arctic.

Key words: Arctic zone of Russia, anthropogenic relief, land development in the Arctic, multidimensional statistics

Acknowledgements. Cluster analysis and processing and interpretation of its results were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-05-60200). Information about the impact of forestry on relief evolution was collected under the State Research Task AAAA-A16-11632810089-5 «Evolution of the environment, relief dynamics and the geomorphologic safety of nature management».

REFERENCES

- Bol'shagin A.Yu., Vyalyshv A.I., Dobrov V.M., Dolgov A.A., Zinov'ev S.V., Ol'tyan I.YU., Gorbatskij V.V. Kompleksnyj monitoring – neot'emlemaya chast' bezopasnosti Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii [Integrated monitoring as an integral part of the security in the Arctic zone of the Russian Federation] // *Arktika. Ekologiya i ekonomika*. 2014. № 1. P. 48–37. (In Russian)
- Chesnokova I.V. Antropogennyy morfogenez v zone razvitiya mnogoletnemerzlykh porod [Anthropogenic morphogenesis in the zone of permafrost development] // *Antropogennaya geomorfologiya*. M.: Kiev: Media-PRESS, 2013. P. 167–173. (In Russian)
- Derkach A.A. Deformacii zashchitnykh inzhenernykh sooruzhenij na trassah magistral'nykh gazoprovodov kak rezul'tat vozdeystviya ekzogennykh processov v usloviyakh Zapolyar'ya [Deformations of protective engineering structures on the routes of gas pipelines as a result of exposure to exogenous processes in polar regions] / *Antropogennaya geomorfologiya: nauka i praktika: materialy XXXII Plenuma Geomorfologicheskoy komissii RAN* (g. Belgorod, 25–29 sentyabrya 2012 g.). M.: Belgorod: ID «Belgorod», 2012. P. 34–39. (In Russian)
- Dmitriev V.G. Poluempiricheskij metod ocenki ekologicheskogo riska shel'fovoj i pribrezhnoj arkticheskoy zony dlya klyuchevykh arkticheskikh rajonov [A semi-empirical method for assessing the environmental risk of the shelf and coastal Arctic zones for key Arctic regions] // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2013. № 4. P. 96–103. (In Russian)
- Ekologicheskij atlas Rossii [Ecological Atlas of Russia] / A.H. Adzhiev, S.A. Bartalyov, M. Yu. Bekkiev I dr. M.: Feoriya, 2017. 510 p. (In Russian)
- El'chaninov E.A. Osnovnye napravleniya inzhenernykh reshenij dlya ohrany prirodnykh kompleksov pri promyshlennom osvoenii Severnykh territorij [The main directions of engineering solutions for the protection of natural complexes under the industrial development of Northern territories] // *Gorn. inf.-anal. byul. Otd. vyp. 1. Trudy Mezhdunarod. nauch. simpoziuma «Nedelya gornyaka – 2014»*. 2014. P. 196–210. (In Russian)
- GOST R 52398-2005. Klassifikaciya avtomobil'nykh dorog. Osnovnye parametry i trebovaniya [Classification of roads. Key parameters and requirements]. M.: Standartinform, 2006. (In Russian)
- Grebenec V.I., Isakov V.A. Deformacii avtomobil'nykh i zheleznykh dorog na uchastke Noril'sk – Talnah i metody bor'by s nimi [Deformations of roads and railways within the Norilsk-Talnakh section and methods of their control] // *Kriosfera Zemli*. 2016. T. 20. № 2. P. 69–77. (In Russian)
- Hlobystin L.P. Drevnyaya istoriya Tajmyrskogo Zapolyar'ya i voprosy formirovaniya kul'tur Severa Evrazii [The ancient history of the Taimyr Arctic and the issues of the formation of cultures of Northern Eurasia]. SPb.: Dmitrij Bulanin, 1998. 340 p. (In Russian)
- Khalturin V.I., Rautian T.G., Richards P.G., Leith W.D. A review of nuclear testing by the Soviet Union at Novaya Zemlya, 1955–1990 // *Science and Global Security*. 2005. № 13. P. 1–42.
- Kochurov B.I., Zotova L.I., Tumel' N.V. Ekodiagnostika opasnykh geoeologicheskikh situacij pri hozajstvennom osvoenii kriolitozony [Ecodiagnosics of dangerous geoeological situations during the economic development of permafrost zone] // *Problemy regional'noj ekologii*. 2015. № 4. P. 157–164. (In Russian)
- Kozhuhov I.V., Firsov Yu.G., Gordienko N.Yu. Severnyj region Rossijskoj Federacii kak zona ekologicheskogo riska i novyj tekhnologicheskij etap osvoeniya Arktiki [The northern region of the Russian Federation as a zone of environmental risk and a new technological stage in the development of the Arctic] // *Ekspluat. mor. transp.* 2013. № 2. P. 73–78. (In Russian)

Kozlova A.E. Antropogennoe preobrazovanie rel'efa v usloviyah hozyajstvennogo osvoeniya territorii poluostrova Yamal [Anthropogenic transformation of the relief under the economic development of the Yamal Peninsula] // *Izv. RAN. Ser. geographicheskaya*. 2013. № 4. P. 87–94. (In Russian)

Marahtanov V.P. Inzhenerno-geograficheskie issledovaniya na trassah magistral'nyh gazoprovodov v kriolitozone [Geographical engineering studies on the routes of gas pipelines in the permafrost zone] // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geographia*. 2011. № 4. P. 42–47. (In Russian)

Pitul'ko V.V. Zhohovskaya stoyanka [Zhokhovskaya archaeological site]. SPb.: Dmitriy Bulanin, 1998. 189 p. (In Russian)

Pyle D. Data preparation for data mining. Morgan Kaufmann, 1993. 467 p.

Romanenko F.A. Geomorfologicheskie opasnosti na arkticheskikh ostrovakh i poberezh'yah [Geomorphologic hazards on Arctic islands and coasts] // *Geomorfologiya i kartografiya: Materialy 33 Plenuma geomorfologicheskoy komissii RAN, Saratov*, 17–11 sent., 2013. Saratov, 2013. P. 234–237. (In Russian)

Rousseuw P.J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis // *Computational and Applied Mathematics*. 1987. № 20. P. 53–65.

Saf'yanov G.A., Repkina T.Yu. Faktory dinamiki beregov Unskoj guby (Letnij bereg Belogo morya) [Factors of the dynamics of the Unskaya Bay coasts (the Summer coast of the White Sea)] // *Sovremennye global'nye izmeneniya prirodnoy sredy. T. 4. Faktory global'nyh izmenenij*. M., 2012. P. 392–400. (In Russian)

Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Grebenets V.I., Luis S. Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia // *Polar Geography*. 2017. 40 (4). P. 273–290.

Shpolyanskaya N.A., Zotova L.I. Ekologicheskaya bezopasnost' Rossijskogo Severa [Environmental safety of the Russian North] // *Ekologiya i promyshlennost'*. 1999. № 9. P. 12–18. (In Russian)

Thorndike R.L. Who Belongs in the Family? // *Psychometrika*. 1953. № 18(4). P. 267–276.

Tumel' N.V., Zotova L.I., Streleckaya I.D. Opasnye kriogennyye processy po trasse gazoprovoda Yamal-Vorkuta: geokologicheskaya ocenka, monitoring [Dangerous cryogenic processes along the route of the Yamal-Vorkuta gas pipeline: geocological assessment and monitoring] // *Narodnoe hozyajstvo Respubliki Komi*. 2005. T. 14. № 3. P. 278–283. (In Russian)

Voskresenskiy K.S. Sovremennyye rel'efoobrazuyushchie processy na ravninah Severa Rossii [Modern relief-forming processes on the plains of the North of Russia]. M.: Geogr. f-t MGU, 2001. 262 p. (In Russian)

Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // *Journal of the American Statistical Association*. 1963. № 58:301. P. 236–244.

Wu J. Advances in k-means clustering: a data mining thinking. Springer, 2012. 180 p.

Zotova L.I., Koroleva N.A., Dedyusova S.Yu. Ocenka i kartografirovaniye krizisnyh ekologicheskikh situacij na territoriyah gazopromyslovogo osvoeniya v kriolitozone [Assessment and mapping of critical environmental situations within the territories of gas field development in the permafrost zone] // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geographia*. 2007. № 3. P. 54–59. (In Russian)

Zotova L.I., Tumel' N.V. Metodologiya vybora prirodohrannykh meropriyatij v oblasti vечноj merzloty na primere Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provincii [The methodology of the selection of environmental measures in the permafrost area: case study of the West Siberian oil and gas province] // *Problemy regional'noj ekologii*. 2018. № 1. P. 93–98. (In Russian)

Web sources:

Arhitektura i gradostroitel'stvo. Ministerstvo stroitel'stva i territorial'nogo razvitiya Murmanskoy oblasti [Architecture and urban planning. Ministry of Construction and Territorial Development of the Murmansk Region] [Elektronnyj resurs]: URL: <https://minstroy.gov-murman.ru/activities/arhitektura/> (access date 06.03.2019). (In Russian)

Geofabrik Download Server [Elektronnyj resurs]: URL: <http://download.geofabrik.de/> (access date 02.03.2019).

Google Earth [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/> (access date 15.03.2019).

Gosudarstvennyj kadastr mestorozhdenij i proyavlenij poleznyh iskopaemykh – Rossijskij Federal'nyj Geologicheskij Fond [The State Cadastre of Deposits and Mineral Occurrences – Russian Federal Geological Fund] [Elektronnyj resurs]: URL: <https://www.rfgf.ru/gkm/> (access date 05.03.2019). (In Russian)

Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures [Elektronnyj resurs]: URL: https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/highway_functional_classifications/ (access date 06.03.2019).

Homepage. Copernicus [Elektronnyj resurs]: URL: <https://www.copernicus.eu/en> (access date 14.03.2019).

Landsat Science [Elektronnyj resurs]: URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (access date 13.03.2019).

OpenStreetMap Rossiya – Karta Online [Russia – Map Online] [Elektronnyj resurs]: URL: <http://openstreetmap.ru/#map=3/62/88> (access date 01.03.2019).

Perechen' rechnyh portov [The list of river ports] [Elektronnyj resurs]: URL: http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/perechen_rechnyh_portop.html (access date 04.03.2019). (In Russian)

Proekt skhemy territorial'nogo planirovaniya Neneckogo avtonomnogo okruga (izmeneniya 2017 goda) [Draft territorial planning scheme of the Nenets Autonomous Okrug (2017 changes)] [Elektronnyj resurs]: URL: <http://gkh.adm-nao.ru/arhitektura-i-gradostroitelstvo/strategicheskoe-planirovanie/proekt-shemy-territorialnogo-planirovaniya-neneckogo-avtonomnogo-okrug/> (access date 09.03.2019). (In Russian)

Proekt Skhemy territorial'nogo planirovaniya RS(YA) [Draft Territorial Planning Scheme for the Republic of Sakha (Yakutia)] [Elektronnyj resurs]: URL: <https://minstroy.sakha.gov.ru/proekt-shemi-territorialnogo-planirovaniya-rs> (access date 12.03.2019). (In Russian)

Reestr morskikh portov [Register of seaports] [Elektronnyj resurs]. URL: http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/reestr_mp.html (access date 03.03.2019). (In Russian)

Skhema territorial'nogo planirovaniya Arhangel'skoj oblasti [Territorial planning scheme of the Arkhangelsk region] [Elektronnyj resurs]: URL: <https://old.dvinaland.ru/region/map/> (access date 08.03.2019). (In Russian)

Skhema territorial'nogo planirovaniya Yamalo-Neneckogo avtonomnogo okruga [Territorial planning scheme of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug] [Elektronnyj resurs]: URL: <https://www.yanao.ru/activity/1530/> (access date 10.03.2019). (In Russian)

Skhema territorial'nogo planirovaniya. Pravitel'stvo Respubliki Kareliya [The scheme of territorial planning. Government of the Republic of Karelia] [Elektronnyj resurs]: URL: <http://old.gov.karelia.ru/Power/Committee/Build/Plan/index.html> (access date 07.03.2019). (In Russian)

Skhemy territorial'nogo planirovaniya Krasnoyarskogo kraya [Territorial planning schemes of the Krasnoyarsk kraj] [Elektronnyj resurs]: URL: <http://minstroy.krskstate.ru/graddoc/terrplan/0/id/25663> (access date 11.03.2019). (In Russian)

Received 29.08.2019

Revised 05.09.2019

Accepted 12.09.2019